

数值模型在石油开采产建项目土壤环境影响评价中的应用

张鹤鹏 (中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 根据土壤中溶质迁移转化模型, 建立黄土溶质运移模型, 以预测非正常状况下油井井场、站场、输油管线等石油泄漏处附近, 石油类物质在土壤剖面的分布、迁移等; 以某油田产能建设项目为例, 采用一维非饱和溶质运移模型, 预测石油类物质对土壤的污染, 为环境影响评价结论提供依据; 预测结果表明, 随着时间的推移, 石油类物质逐渐向包气带土壤垂向深度迁移, 但浓度逐渐降低。

关键词: 数值模型; 土壤影响; 土壤环境影响预测

石油开采产能建设项目从钻井、采油、集输、原油处理到采出水回注, 开发的各个环节均可能对土壤环境产生污染, 但均发生在事故排放下, 其影响主要是由于石油类污染物排入土壤环境后造成土壤结构的改变、降低土壤质量, 影响同外界的物质、能量交换, 影响植被生长。在一定条件下, 石油烃中不被土壤吸收的部分还可能渗入地下继而污染地下水。石油的流动性较差, 泄漏后对土壤的垂直影响范围主要集中在 0~30cm 左右的表层, 最深可达到 80cm^[1-3], 通过及时采取应急处置措施, 石油开发过程对土壤的污染影响可基本控制在泄漏点周边小范围内, 且主要集中在井场、站场或管线占地范围内。以某油田产能建设项目为列 (以下简称“项目”), 在土壤理化性质分析和区域土壤中水分迁移规律研究的基础上, 采用一维非饱和溶质运移模型, 预测非正常情况下, 石油泄漏后落地油对周围土壤环境的污染影响。

1 项目区土壤概况

1.1 土壤类型

项目区主要广泛分布的土壤类型主要有黄绵土、黑垆土、新积土、灰褐土和水稻土 5 个土类, 其中用于耕作的土壤类型以黑垆土和黄绵土为主, 塬面主要为黑垆土、黄绵土, 山地和川道多为黄绵土。根据国家土壤信息服务平台数据, 项目区评价范围内主要土壤类型包含黑垆土、黄绵土和新积土 3 类。

1.2 土壤理化特性

为了解区域土壤理化特性, 收集了项目区往年涉及黑垆土、黄绵土和新积土 3 类土壤的理化特性数据。

2 石油类在土壤中的污染途径

石油类是大分子疏水粘性物质, 石油分子极易粘附于土粒表面, 而粘附于土粒表面的石油类污染物更易于粘附更多的石油类污染物, 阻塞土壤孔隙。根据张海玲等人关于陇东油田井场石油类物质自然迁移规律的研究结果: 石油进入土壤后, 固相组分的主要污染范围集中在地表之下 0~30cm, 并以 0~5cm 处含量最高, 但在降雨条件下, 落地油中的石油类变为可溶态后可随水进一步向土壤深层迁移扩散。

3 水流及溶质运移模型建立

水是污染物运移的载体, 若进行土壤中污染物运移的模拟需要先对土壤中水分运移过程进行刻画。项目地

面工程绝大部分位于梁峁区梁顶相对平坦的部位, 包气带厚度较厚, 且岩性为黄土, 因此确定以黄土包气带为建模对象。

3.1 水流运移的数值模型

3.1.1 包气带水分运移的概念模型

项目区黄土垂直节理发育, 包气带水分运移以垂向为主, 因此将包气带概化为垂向一维的水分运动。考虑到污染物在包气带中的运移特点、评价区包气带的厚度, 同时参考已有的黄土地区的包气带水分运移规律研究, 本次模拟的包气带上边界设置为大气边界, 下边界设置为自由排水边界。

3.1.2 包气带水分运移的数值模型

3.1.2.1 控制方程与边界条件

土壤中水流运动的控制方程为一维垂向饱和——非饱和水分运动方程 (Richards 方程):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(1 + \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); k 为非饱和渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{hour}^{-1}$); t 为时间变量 (hour^{-1}); h 为压力水头; z 为空间变量 (cm), 地表为原点, 向上为正。

3.1.2.2 模型参数

包气带水力学参数包括土壤水分特征曲线参数和土壤垂直入渗系数。

3.1.2.2.1 土壤水分特征曲线

考虑到污染物主要在土壤浅表层聚集, 根据同区域其他同类项目以往野外现场调查采集的一组黄土原装样, 在室内采用土壤水分特征曲线测试仪测定的拟合土壤水分特征曲线所需的负压和含水率变化值, 然后利用 van Genuchten-Mualem 公式对土壤水分进行拟合。

3.1.2.2.2 土壤垂直入渗系数

土壤垂向入渗系数由渗水试验确定, 为可能需要的进一步预测提供必要的参数。经查阅相关文献资料, 在项目所在区域内已有研究人员做了一些土壤渗透性的研究工作, 具有较好的代表性; 根据以往研究人员的研究成果及资料, 项目区包气带渗透系数一共获得 20 组数据, 由于不同土地利用类型、土壤的初始含水率以及坡向的不同对渗透系数的测定产生一定影响, 主要分布

在 0.34~6.11m/d (3.98×10^{-4} ~ 7.08×10^{-3} cm/s) 之间, 算数平均值为 1.89m/d (7.875cm/hour), 作为模拟预测的依据。

3.1.2.3 模型剖分与初始条件

模拟厚度设置为 100m, 模型剖分按 10cm 间隔, 共 1001 个节点。初始含水率设置为田间持水量。

3.2 溶质运移的数值模型

3.2.1 预测模型

采用《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》(HJ964-2018)附录 E 推荐的一维非饱和和溶质运移模型进行预测, 该方法适用于某种污染物以点源形式垂直进入土壤环境的影响预测, 重点预测污染物可能影响的深度。一维非饱和和溶质垂向运移控制方程:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc) \quad (2)$$

式中: c 为污染物介质中的浓度, mg/L; D 为弥散系数, m^2/d ; q 为渗流速率, m/d; z 为沿 z 轴的距离, m; t 为时间变量, d; θ 为土壤含水率, %。

初始条件: $c(z,t)=0, t=0, L \leq z < 0$

边界条件: 第一类 Dirichlet 边界条件, 其中式(3)适用于连续点源情景, 式(4)适用于非连续点源情景。

$$c(z,t)=c_0 t > 0, z=0 \quad (3)$$

$$c(z,t) = \begin{cases} c_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (4)$$

第二类 Neumann 零梯度边界。

$$-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad t > 0, z = L$$

3.2.2 模型概化

3.2.2.1 边界条件

项目区降雨多集中在夏季, 且多为短时暴雨, 因此将石油类的渗漏概化为非连续性的点源污染。根据项目区气象条件, 本次模拟假设降雨量为 50mm/d, 降雨持续时间为 2d, 地面蒸发量为 6mm/d。上边界为有积水的降雨条件, 下边界为自由排水边界。

3.2.2.2 模型参数选取

模型解算采用美国盐土试验室 Hydrus-1D (Soil Profile-Graphical Editor) 软件(以下简称“Hydrus-1D 软件”), 利用软件建立评价区黄土溶质模型。

石油类比水轻, 且在水中的溶解度较低, 参照 TPHCWG (1997) 中关于石油类污染物的溶解度等相关文献, 石油类可溶态污染物的最高浓度值约为 18mg/L。根据国内(如张森等)在室内对保守溶质在黄土中的穿透曲线, 考虑室内和室外的尺度差异, 石油类纵向弥散系数取值为 19.5, 自由水中扩散系数取值为 16.7。根据吸附解析的实验研究, 采用 Herry 吸附模型刻画石油类的吸附动力学过程, 饱和吸附量取值为 134.07, 吸附系数取值为 0, 经验系数 beta 取值为 1。

3.2.2.3 模型剖分与初始条件

在 Hydrus-1D 软件中对包气带土层进行设定, 模拟

土层厚度设置为 40m, 模型剖分按 10cm 间隔, 共 401 个节点; 初始含水率设置为田间持水量 10%。

4 石油类污染物对土壤环境影响预测结果及分析

4.1 土壤水分特征曲线拟合

模型解算采用 Hydrus-1D 软件, 拟合获得的土壤水分特征曲线见图 1。

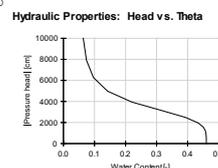


图 1 土壤水分特征曲线拟合图

4.2 土壤溶质运移预测结果

基于选取污染物的源强及模型参数, 模型解算采用 Hydrus-1D 软件, 石油类物质一维非饱和和溶质运移估算结果, 根据估算结果可知, 在短时泄漏发生后, 石油类物质向下迁移形成垂向污染晕, 污染晕锋面处的浓度随深度的加深而逐渐减小; 随着石油类物质不断下渗, 污染物的累计速度未超过污染物随着土壤自净速度和容纳能力, 土壤中污染深度不断增加, 但污染物浓度不断减小。石油泄漏发生后, 石油类物质运移发生第 10d 时, 土壤表层石油类浓度最大, 1.58×10^3 mg/kg; 污染物最大运移深度 6.8m, 对应浓度 4.73×10^{-7} mg/kg; 运移至 100d 时, 最大浓度为 0.495×10^3 mg/kg, 对应深度 2m 处; 最大运移深度为 12.8m, 对应浓度 1.98×10^{-7} mg/kg; 运移至 365d, 最大浓度为 0.31×10^3 mg/kg, 对应深度 4m 处; 最大运移深度为 18.8m, 对应浓度 1.66×10^{-7} mg/kg; 运移至 1000d 时, 最大浓度为 0.23×10^3 mg/kg, 对应深度 11.6m 处; 最大运移深度为 26.2m, 对应浓度 1.48×10^{-7} mg/kg。

5 结论与建议

本文以某油田产能建设项目为例, 在非正常状况下, 将石油类的渗漏概化为非连续性的点源污染; 假设降雨量为 50mm/d, 降雨持续时间为 2d, 地面蒸发量为 6mm/d, 土壤水中石油类的初始浓度为 18mg/L, 采用 Hydrus-1D 软件建立数值模型, 模拟石油类物质在土壤水中的运移规律。通过模拟结果可知, 随着时间的推移, 石油类逐渐向包气带土壤垂向深度迁移, 但浓度逐渐降低; 同时可以看出, 当落地油洒落于地面, 在有强降雨持续发生时, 雨水对落地油的淋滤作用会导致周边的浅层土壤环境在一段时间内受到石油类的污染; 最终随着运移时间的增加, 在土壤自身的净化作用以及迁移条件下, 土壤中的石油类影响会逐渐消失。

参考文献:

- [1] 张俊, 陈家军, 王红旗. 数值模拟在土壤环境影响评价中的应用 [J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 234-237.
- [2] 丁素玲. HYDRUS-1D 软件在土壤环境影响评价中的应用 [J]. 环境影响评价, 2020, 42(4): 62-65.
- [3] 李萍. 黄土中水分迁移规律研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.